

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560199

研究課題名(和文) 管内圧縮波の長距離非線形伝播における形成衝撃波の消滅現象の解明

研究課題名(英文) Research on the disappearance phenomenon of forming shock wave in the non-linear propagation of compression wave in the long tube

研究代表者

青木 俊之 (Aoki, Toshiyuki)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：20150922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：急激な圧力変動を伴う圧縮波、衝撃波や膨張波は総称して圧力波と呼ばれ、これらの圧力波が長い管路(パイプラインやトンネル)を伝播する際の急激な圧力変動を制御するには、伝播過程における圧力波の強さの減衰や波面の時間的変形、すなわち波動伝播の非線形現象、形成衝撃波の消滅現象を正確に知ることが必要である。本研究では、レーザー作動干渉計を用いた詳細な実験を用い、極めて長い管内を伝播する圧力波の波面変形に関する形成衝撃波の消滅現象、非線形現象、非定常境界層の遷移現象の詳細な測定を行い有益なデータを得た。

研究成果の概要(英文)：A compression wave, a shock wave and an expansion wave are generally called a pressure wave. These waves induce rapid pressure fluctuation. In order to control the rapid pressure fluctuation at the time of these pressure waves propagating in a long tube (a pipeline and a tunnel), it is required to get to know correctly attenuation of the strength of the pressure wave and time modification of a wavefront in a propagation process, i.e., the nonlinear phenomenon of propagation and the disappearance phenomenon of forming shock wave in the non-linear propagation of compression wave in the long tube. In this research, detailed measurement of the changes phenomenon of the forming shock wave and the unsteady boundary layer about wavefront modification of the pressure wave which propagates in very long tube was performed using the detailed experiment which used the laser differential interferometer, and useful data was obtained.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：圧縮波 衝撃波 非線形現象 境界層 非定常流れ 遷移現象

1. 研究開始当初の背景

近年、工業の発展とともに、健康の保護と生活環境の保全という観点から、環境基準はますますきびしくなっている。特に、二酸化炭素を中心とする温室効果ガスの削減対策が日本でも問題になってきている。その二酸化炭素の発生源としての交通機関の寄与は、全体の約 20%も占めておりその大半は自動車によるもので、近年増加傾向にある。そこでその対策として自動車から公共輸送機関へのモーダルシフトが唱えられている。この流れの中で特に鉄道は、環境に優しくかつエネルギー効率の優れた多量輸送機関として欠かすことのできないものである。新しい鉄道列車の開発には環境に適応した技術開発が必要で、特に高速化する在来型新幹線列車および次世代の超高速列車である超伝導リニア新幹線列車走行時に発生する空気力学的な騒音や空気抵抗の低減が、重要な学術的研究課題と言える。

これらの高速鉄道における空気力学的な騒音環境問題の一つに、トンネル出口から放射される衝撃的低周波騒音(トンネル微気圧波)がある。この衝撃的低周波騒音は、列車のトンネル突入により形成された圧力波がトンネル内を伝播し、トンネル出口に達して放射され、その大きさはトンネル出口に到達した圧力波の波面の圧力勾配が大きいほど大きくなると考えられている。

しかし近年、長大スラブ軌道トンネル(長さ 10km 以上、スラブ軌道：レールの下がバラストでなくコンクリート板)において従来より予測されていた騒音レベルより、予測値よりのばらつきが大きいことが判明し、高速列車における環境問題解決の障害の一つになっている。この原因の一つに、長大スラブ軌道トンネルにおいては、トンネル出口からの衝撃的低周波騒音のレベルは、トンネル出口に到達する圧力波の波面の圧力勾配だけでなく、トンネル入口圧力波の波面構造に依存すると考えられているが、その詳細は不明である。さらに、次世代の超伝導リニア高速列車では、超高速性を踏まえ、トンネルはできる限り直線に近い形を基本とするため、大都市部においては大深度地下かつ長距離トンネルが計画されている。このような超高速列車用長大トンネルでは、圧力波の非線形伝播により波面形状の歪み、衝撃波波面の形成、形成衝撃波の発達、減衰が生じることとなる。これらはトンネル出口騒音のみならず、トンネル内の伝播圧力波と対向列車との干渉による圧力変動や車内の衝撃的騒音を引き起こし、これらの波動干渉問題を解決するためには、トンネル内の圧力波の長距離伝播過程における散逸非線形効果を解明する必要がある。

2. 研究の目的

急激な圧力上昇を伴う圧縮波や衝撃波などの圧力波が管内を長距離伝播する際(パイプラインや長大トンネル)の急激な圧力変動

を正確に予測するには、その非線形伝播過程における圧力波の強さの減衰や波面の時間的変形、すなわち波動伝播の非線形現象を正確に知ることが必要である。本研究は、波動シミュレーター管内の圧力波の長距離伝播における波面形状の歪み、衝撃波の形成、その後の衝撃波の非線形変形消滅現象を測定すると共に、本研究室で開発したレーザー差動干渉計を用いて管内を伝播する圧力波背後に発達する非定常流の層流から乱流への遷移および逆遷移現象を測定し、長距離非線形伝播に伴う衝撃波の形成・発達・減衰および消滅現象に対する非定常流の影響を解明しようとするものである。

3. 研究の方法

(1) 急激な圧力上昇を伴う圧縮波や衝撃波などの圧力波が管内を長距離伝播する際(パイプラインや長大トンネル)の急激な圧力変動を正確に予測するには、その非線形伝播過程における圧力波の非線形現象を正確に知ることが必要である。そのため、内径 16mm、長さ 100m の極めて長い管路内を伝播する弱い衝撃波における距離減衰・非線形特性を模型実験により解析した。さらに、長い管路の途中に多孔管を設置し長距離非線形伝播に伴う衝撃波の形成・発達・減衰に及ぼす影響を調べた。つぎに、56×56mm の矩形管内を長距離伝播する圧縮波の背後の非定常流れをレーザー作動干渉計を用いた詳細な測定を行うことにより、管内を伝播する圧力波の波面変形に関する非定常境界層の遷移現象の有益なデータを得た。

(2) 波動シミュレーターの 56×56mm の矩形管を長さ 61m に延長し、極めて長い管路内を伝播する弱い圧力波の境界層測定を可能にした。レーザー差動干渉計を、管内を伝播する圧力波(圧縮波、衝撃波)の背後に発達する流れの助走部、および管内流れの発達部の非定常測定をすることにより、非定常流れの層流から乱流への遷移現象を詳細に測定できるように改良発展させた。さらに、波動シミュレーターとレーザー差動干渉計を組み合わせることにより、極めて長い管路内を伝播する圧力波の波動伝播、特に長距離非線形伝播により形成される非定常境界層の層流・乱流遷移現象の詳細な計測を行った。

(3) レーザー差動干渉計を用い、極めて長い管路内を伝播する圧力波の波動伝播、特に長距離非線形伝播により形成される衝撃波の消滅現象に関係する圧力波背後の非定常流れの境界層の遷移現象を測定した。さらに、非定常流れの境界層の遷移については、層流境界層の間にある乱流遷移開始時間と圧力波形から求めた圧力が極大になる時間の関係を調査した。測定された密度波形から境界層の外縁形状を見積り、遷移時間より圧力波の構造図を導くことにより境界層内の状態を調査した。

4. 研究成果

(1) 内径 16mm、最大長さ 100m の極めて長い

管路内を伝播する弱い衝撃波における距離減衰・非線形特性を模型実験により解析し、その結果、衝撃波の形成距離、及び衝撃波の強さの最大値は、初期波面前面の形状の影響を受け、また、衝撃波の消滅する距離は、初期波面の形状には関係なく初期強さが大きいほど長くなることがわかった。

多孔管を設置することにより、衝撃波が圧縮波に遷移したのちの圧縮波の波面の減衰がさらに促進されることが実験的に確認、その多孔管の設置位置は圧力波の波面の圧力の時間的勾配が大きいところが最も効果的であることがわかった。

56×56mm の矩形管内を長距離伝播する圧縮波の背後の非定常流れをレーザー作動干渉計を用いた詳細な測定を行うことにより、圧力波形のオーバーシュート、境界層内の空間的な変化、主流との相対密度から導き出した遷移の終了時間から非定常境界層の遷移レイノルズ数のデータを得るとともに、極めて長い管路内を伝播した圧縮波の背後の非定常境界層の遷移特性を明らかにした。

(2) 波動シミュレーターの波動伝播管を 56×56mm の矩形管と設定し、長距離伝播がシミュレートできるように長さ/内径比が 1089 倍の 61m とすることができた。

波動シミュレーターの波動伝播管内を伝播する圧力波の非線形効果を測定するため、高感度圧力変換器を波動伝播管に取り付け、波動伝播管ないの圧力変動をメモリハイコーダで記録測定した。その結果、波動伝播管 56×56mm の矩形管内を長距離伝播したときの伝播圧力波に対し、波面形状の非線形変形およびその伝播特性に関する基礎的資料を得た。

非常に長い管路内を伝播する圧力波の特性を明らかにするために、レーザー差動干渉計による非定常の密度測定から、管内の非定常流れの層流・乱流遷移現象を明らかにした。さらに、壁面からの測定位置を変更して、背後に発達する非定常境界の助走部における、境界層の層流・乱流遷移を測定し、非定常境界層の遷移開始時間と伝播圧力波形の減衰開始時間の測定により、非定常境界層の遷移現象と伝播圧力波形との関係を実験的に初めて明らかにした。

(3) レーザー差動干渉計を用い、極めて長い管路内を伝播する圧力波の波動伝播、特に長距離非線形伝播により形成される衝撃波の消滅現象に関係する圧力波背後の非定常流れの境界層の遷移現象の影響を明らかにした。

圧縮波の長距離伝播の波面の変形については、圧縮波が長距離を伝播することで、非線形効果により波面が切り立ち、波面の一部が衝撃波へと遷移することや距離減衰が確認された。

非定常流れの境界層の遷移については、層流境界層の間にある乱流遷移開始時間と圧

力波形から求めた圧力が極大になる時間の関係より、圧力波形が非定常境界層の遷移に影響を与えているということが確認できた。境界層内で緩やかな密度上昇が急激な上昇になり、再び緩やかに上昇し始める現象が確認できた。この時、境界層プロファイルが層流から乱流に変化し、さらに乱流から層流に逆遷移しているものと考えられる。

測定された密度波形から境界層の形を見積もることができ、さらに密度波形からの遷移時間を用い、圧力波の構造図を導くことにより境界層内の状態を推測することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Xiao HU, Toshiyuki AOKI, Naoya TOKURA, The feature of weak shock wave propagated in a overlong tunnel、Proceedings of 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science、査読無、Vol.1、2012、pp.1-6、USB

Toshiyuki TANAKA, Toshiyuki AOKI, Tomo ORITA, Nobuaki KONDOH, Characteristics of unsteady boundary layer induced by the compression wave propagating in a tunnel、査読無、Vol.1、2012、pp.1-6、USB

Xiao Hu, Toshiyuki Aoki, Naoya Tokura, The Feature of Weak Shock Wave Propagated in a Overlong Tunnel、Open Journal of Fluid Dynamics、査読有、Vol.2、2012、pp.285-289、doi:10.4236/ojfd.2012.24A034

Toshiyuki Tanaka, Toshiyuki Aoki、Characteristics of Unsteady Boundary Layer Induced by the Compression Wave Propagating in a Tunnel、Open Journal of Fluid Dynamics、査読有、Vol.2、2012、pp.257-263、doi:10.4236/ojfd.2012.24A030

胡筱、青木俊之、近藤信昭、山崎弘、小川卓哉、多孔壁を持つ長い管路における弱い圧力波の伝播特性、日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集、査読無、Vol.1、2013、pp.1-2

Takuya Ogawa, Toshiyuki Aoki, Hiromu Yamasaki, Nobuaki Kondo, Masaki Ogishima, CHARACTERISTIC ON NONSTEADY BOUNDARY LAYER INDUCED BY PROPAGATING PRESSURE WAVE IN LONG TUBE、Proceedings of 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science、査読無、Vol.1、2014、pp.1-5、USB

青木俊之、近藤信昭、安養寺正之、小川卓哉、中尾祐二郎、荻島真樹、長い管路を伝播する圧力波の誘起する境界層に関す

る研究、日本機械学会九州支部第 68 期講演会講演論文集、査読無、Vol.1、2015、pp141-142

[学会発表](計 7 件)

Xiao HU, Toshiyuki AOKI, Naoya TOKURA、
The feature of weak shock wave propagated in a overlong tunnel、4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science、2012 年 10 月 14 日~2012 年 10 月 17 日、Busan, Korea

Toshiyuki TANAKA, Toshiyuki AOKI, Tomo ORITA, Nobuaki KONDOH、Characteristics of unsteady boundary layer induced by the compression wave propagating in a tunnel、4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science、2012 年 10 月 14 日~2012 年 10 月 17 日、Busan, Korea

胡筱、青木俊之、近藤信昭、山崎弘、小川卓哉、多孔壁を持つ長い管路における弱い圧力波の伝播特性、日本機械学会流体工学部門講演会、2013 年 11 月 09 日~2013 年 11 月 10 日、福岡市

青木俊之、近藤信昭、山崎弘、小川卓哉、荻島真樹、長い管路を伝播する圧力波により誘起される非定常境界層の特性、日本機械学会九州支部講演会、2014 年 03 月 13 日~2014 年 03 月 14 日、北九州市

青木俊之、山崎弘、小川卓哉、長い管路内を伝播する圧縮波の誘起する境界層と伝播特性に関する研究、平成 25 年度衝撃波シンポジウム、2014 年 03 月 05 日~2014 年 03 月 07 日、神奈川県相模原市

Takuya Ogawa, Toshiyuki Aoki, Hiromu Yamasaki, Nobuaki Kondo, Masaki Ogishima、CHARACTERISTIC ON NONSTEADY BOUNDARY LAYER INDUCED BY PROPAGATING PRESSURE WAVE IN LONG TUBE、5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science、2014 年 09 月 23 日~2014 年 09 月 26 日、Nagasaki, Japan

青木俊之、近藤信昭、安養寺正之、小川卓哉、中尾祐二郎、荻島真樹、長い管路を伝播する圧力波の誘起する境界層に関する研究、日本機械学会九州支部第 68 期講演会、2015 年 03 月 13 日~2015 年 03 月 13 日、福岡市

6 . 研究組織

(1)研究代表者

青木 俊之 (AOKI TOSHIYUKI)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：20150922